

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ANDRÉ DE FARIA DIAS

**IMPLEMENTAÇÃO DE MICRORREDES RESIDENCIAIS EM CORRENTE
CONTÍNUA ATRAVÉS DA MICROGERAÇÃO**

Guaratinguetá
2013

ANDRÉ DE FARIA DIAS

**IMPLEMENTAÇÃO DE MICRORREDES RESIDENCIAIS EM CORRENTE
CONTÍNUA ATRAVÉS DA MICROGERAÇÃO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias

Guaratinguetá
2013

D541i	Dias, André de Faria Implementação de microrredes residenciais em corrente contínua através da microgeração / André de Faria Dias – Guaratinguetá : [s.n], 2013. 48 f : il. Bibliografia: f. 45-48 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013. Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias 1. Energia – conservação 2. Energia – Fontes alternativas I. Título
	CDU 620.91

ANDRÉ DE FARIA DIAS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

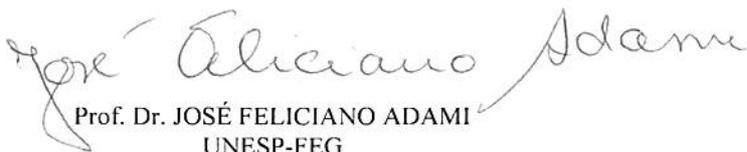
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERELLA BALESTIERI
UNESP-FEG



Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
UNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

ANDRÉ DE FARIA DIAS

NASCIMENTO	11.03.1988 – MOGI GUAÇU / SP
FILIAÇÃO	Cassimiro de Souza Dias Rosemary de Faria Dias
2004/2006	Curso Técnico em Eletroeletrônica no Colégio Técnico de Campinas – Universidade Estadual de Campinas
2009/2013	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Campus de Guaratinguetá

de modo especial, aos meus pais Cassimiro e Rosemary e aos meus irmãos Heverton, Jander, João Pedro e Marissa que sempre me apoiaram e proporcionaram as condições necessárias para que eu chegasse ao fim da graduação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por sempre me dar forças para continuar nos momentos difíceis e, também,

ao meu orientador *Prof. Dr. Rubens Alves Dias* que me deu todo o suporte para a realização deste trabalho de graduação.

à minha família, meus pais *Cassimiro e Rosemary*, e meus irmãos *Heverton, Jander, João Pedro e Marissa*, os quais não mediram esforços para me conceder condições para eu continuar meus estudos e, mesmo em tempos difíceis, estavam ao meu lado me incentivando a ir cada vez mais longe.

aos meus amigos da república Chatuba, onde pude crescer, aprender e me desenvolver. Em especial, Carlos (DD), Bruno (Lanterna), Rodolfo (Pardal), Leonardo (Chant), Guilherme (Matão), Vinicius (Corvo), Guilherme (Bufa), Heitor (Burns) e Renan (Nho-Nho).

aos meus amigos de moradia em Jundiaí, que me apoiaram durante o período de estágio.

aos meus companheiros de música de todos os tempos, em especial Tiago Rosa, Renan Polato, Bruno César, Bruno Neto, Orlando Neto, Renan Carvalho e os integrantes do Grupo Resenha: Gabriel (Gnu), Bruno (Preda), Lucas (Stifler), Luan (Muralha), Moacir (Iça), Bruno (Gepeto), Guilherme (Dako) e Victor (Bitoca).

à minha namorada, Marina, por ser minha companheira e me incentivar a continuar mesmo diante do cansaço.

e, finalmente, agradeço a todos os professores da UNESP-Guaratinguetá pelos ensinamentos que levarei para a vida.

“Uma vida sem desafios não vale a pena ser vivida.”

Sócrates

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Reservatório da Usina de Balbina no Rio Uatumã	13
Figura 2.1- Distribuição centralizada de energia elétrica	16
Figura 2.2 – Distribuição descentralizada de energia elétrica	17
Figura 2.3 - Países que mais produziram energia elétrica utilizando-se de painéis solares.	18
Figura 2.4 – Previsão da capacidade instalada de painéis solares no mundo.....	18
Figura 3.1 – Arranjos de aterramento: (a) TN-S; (b) IT.....	27
Figura 3.2 – Configurações para uma rede residencial: (a) em CA; (b) em CC.	30
Figura 3.3 – Microrrede CC conectada a rede.....	31
Figura 3.4 – Custos de um projeto de microgeração solar.	32
Figura 3.5 – Topologia Híbrida.	32
Figura 3.6 – Consumos setoriais de energia elétrica referentes a 2005.....	33
Figura 3.7 – Comparação de perdas em redes CC e CA.	34
Figura 4.1 – Módulo de microgeração fotovoltaica aliado à uma microrrede CC.	36
Figura 5.1 – Evolução da utilização da energia solar no mundo. Erro! Indicador não definido.	
Figura 5.2 – Evolução da utilização da energia solar na Europa. Erro! Indicador não definido.	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Evolução do aproveitamento das usinas hidrelétricas.	14
Tabela 3.1 – Consumo de aparelhos televisores.....	23
Tabela 3.2 – Parâmetros para dimensionamento dos cabos em CC.	24
Tabela 4.1 – Consumo de aparelhos residenciais.....	37
Tabela 4.2 – Lista de materiais.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	- Corrente Contínua
CA	- Corrente Alternada
DC	- <i>Direct Current</i>
AC	- <i>Alternating Current</i>
EDP	- Energias de Portugal
INEE	- Instituto Nacional de Eficiência Energética
CELG	- Companhia Energética de Goiás
EPIA	- <i>European Photovoltaic Industry Association</i>
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
MME	- Ministério de Minas e Energia
LCD	- <i>Liquid Crystal Display</i>
GTO	- <i>Gate Turn Off Tiristor</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- área
P	- potência
e	- queda de tensão máxima admissível
L	- comprimento
S	- secção transversal do cabo
σ	- condutividade elétrica
U	- tensão
I	- corrente elétrica
V_p	- tensão de pico
V_{ef}	- tensão eficaz
η	- rendimento
W_D	- energia diária
H_s	- horas de sol
E	- radiação global incidente
G	- irradiância
V_n	- tensão nominal
I_n	- corrente elétrica nominal
I_{dia}	- consumo diário de corrente elétrica
N_s	- número de painéis conectados em série
N_F	- número de fileiras de painéis
C_G	- custo da geração
D_{20}	- demanda em 20 anos
T_A	- tempo de amortização da dívida

DIAS, A. F. **Implementação de microrredes residenciais em corrente contínua através da microgeração.** 2013. 49 f. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

Neste trabalho aborda-se a importância da eficiência energética e do emprego de fontes alternativas de energia, frente a crescente demanda de energia e às concomitantes restrições de natureza econômica, social e ambiental impostas pela sociedade. As fontes alternativas, neste trabalho, são ilustradas pela microgeração através de painéis solares, aerogeradores eólicos ou células a combustível. A eficiência energética é apresentada pelas microrredes em corrente contínua, pois seu emprego exclui as perdas relacionadas às conversões de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) feitas com o intuito de se injetar energia na rede elétrica e depois a conversão inversa, CA para CC, a fim de alimentar cargas residenciais. Tem-se como objeto analisar um estudo de caso e avaliar os custos e a viabilidade técnica de um projeto que alia uma microrrede CC a um módulo de microgeração.

PALAVRAS-CHAVE: Microgeração. Microrredes em corrente contínua. Eficiência energética. Uso racional de energia elétrica.

DIAS, A. F. **Implementation of residential DC microgrids through microgeneration.** 2013. 49 f. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

This paper discusses the importance of energy efficiency and the use of alternative energy sources, facing to the increasing energy demand and the concomitant economic, social and environmental restrictions imposed by society. In this work, alternative sources are illustrated by photovoltaic, micro turbines and fuel cells microgeneration systems. Energy efficiency is presented by direct current microgrids because its uses excludes the conversions of direct current (DC) to alternating current (AC) losses made with the intention of injecting energy into the electric grid and then the inverse conversion, AC to DC, in order to feed residential loads. The object of this paper is to analyze a case study and evaluates the costs and technical feasibility of a Project that combines a DC microgrid and a microgeneration system.

PALAVRAS-CHAVE: Microgeneration. DC Microgrids. Energy efficiency. Rational use of energy.

SUMÁRIO

1	IMPORTÂNCIA DAS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA ELÉTRICA	13
1.1	INTRODUÇÃO	13
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
1.3	ASSUNTOS ABORDADOS	14
2	PANORAMA GERAL DA MICROGERAÇÃO.....	15
2.1	INTRODUÇÃO	15
2.2	PANORAMA MUNDIAL DA MICROGERAÇÃO E DAS MICRORREDES CC.....	15
2.3	PANORAMA NACIONAL DA MICROGERAÇÃO E DAS MICRORREDES CC.....	19
2.4	TENDÊNCIAS.....	21
3	ASPETOS CONCEITUAIS.....	22
3.1	INTRODUÇÃO	22
3.2	TOPOLOGIA	22
3.2.1	Dimensionamento de cabos em corrente contínua.....	23
3.2.2	Sistema de proteção e acessórios	26
3.2.3	Arranjos.....	30
3.3	VANTAGENS.....	33
4	APLICAÇÃO.....	36
4.1	INTRODUÇÃO.....	36
4.2	SISTEMA A SER ANALISADO	36
4.2.1	Dimensionamento do Sistema Fotovoltáico	37
4.2.2	Dimensionamento da Microrrede CC	40
4.3	ANÁLISE DE CUSTOS	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 IMPORTÂNCIA DAS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA ELÉTRICA

1.1 INTRODUÇÃO

No atual contexto em que países de todo o mundo almejam disponibilizar uma oferta maior de energia para atender a crescente demanda e, simultaneamente, reduzir o impacto ambiental da produção de energia, a utilização de fontes alternativas sugere uma saída possível e viável (WWF, 2012).

1.2 JUSTIFICATIVA

As restrições econômicas, sociais e ambientais impostas às grandes obras com intuito de gerar energia elétrica têm conduzido os responsáveis a uma reformulação na maneira de se gerar energia, visando à eficiência energética e a sustentabilidade da fonte geradora. Erros de projeto como o da usina de Balbina, na qual a floresta às margens do rio Uatumã foi alagada pela represa, por exemplo, aguçam ainda mais as discussões sobre o assunto. A Figura 1.1 ilustra o reservatório da usina de Balbina localizada na cidade de Presidente Figueiredo no estado do Amazonas. A Tabela 1.1 apresenta valores comparativos da evolução de grandes hidrelétricas brasileiras, revelando a desproporção entre área alagada e potência gerada que houve nesse caso.

Figura 1.1 - Reservatório da Usina de Balbina no Rio Uatumã



Fonte: (ÉPOCA, 2009)

Tabela 1.1 – Evolução do aproveitamento das usinas hidrelétricas.

Usinas	Área dos Reservatórios (A) [km ²]	Potência (P) [MW]	A / P [km ² / MW]
Balbina	2360	250	9,44
Samuel	584	217	2,69
Tucuruí	2414	4000	0,61
Jirau	258	3300	0,08

Portanto, as técnicas que possibilitam melhorias na utilização, e também na eficiência da energia elétrica, devem ser analisadas e implementadas, de acordo com sua viabilidade.

A microgeração e as microrredes, de maneira análoga às tecnologias emergentes, precisam de tempo para melhorarem seu desempenho, mesmo sabendo que os estudos guiados tem apontado resultados promissores no que diz respeito a viabilidade técnica destas (COSTA, 2010).

1.3 ASSUNTOS ABORDADOS

No segundo capítulo é demonstrado um panorama geral tanto da microgeração quanto das microrredes, iniciando com uma abordagem internacional e, posteriormente, uma análise de tais assuntos no cenário nacional.

Já no terceiro capítulo são apresentados os aspectos conceituais acerca das peculiaridades do projeto de uma microrrede e de um módulo de microgeração. Temas como aterramento, interrupção de correntes CC e dimensionamento de cabos foram abordados neste capítulo.

No quarto, capítulo as técnicas apresentadas no capítulo anterior são aplicadas em um exemplo de projeto, finalizando com o custo deste.

No quinto capítulo é apresentada uma visão geral dos resultados obtidos.

2 PANORAMA GERAL DA MICROGERAÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Devido ao cenário energético atual receber cada vez mais restrições estruturais e ambientais, a microgeração se comporta como uma solução viável para clientes residenciais.

As principais fontes de energia utilizadas na microgeração, como a solar através de painéis fotovoltaicos e a eólica através de aerogeradores, geram energia em corrente contínua. Deste modo, a implementação de microrredes em corrente contínua faz o uso racional da energia elétrica, pois se excluem as perdas relativas às conversões CC para CA feitas com o intuito de se injetar energia na rede elétrica e depois a conversão inversa, CA para CC, a fim de alimentar dispositivos eletrônicos.

2.2 PANORAMA MUNDIAL DA MICROGERAÇÃO E DAS MICRORREDES CC

A Europa tem se destacado na utilização da microgeração e na produção de tecnologia que viabilize a implementação desta ideia. Segundo Devienne Filho (2013) tal destaque deve-se a alguns motivos como: elevado número de prestadores de serviço na área, fabricantes de equipamentos específicos, medidores residenciais eletrônicos utilizando o conceito de redes inteligentes e programas de fomento veiculados pelo governo.

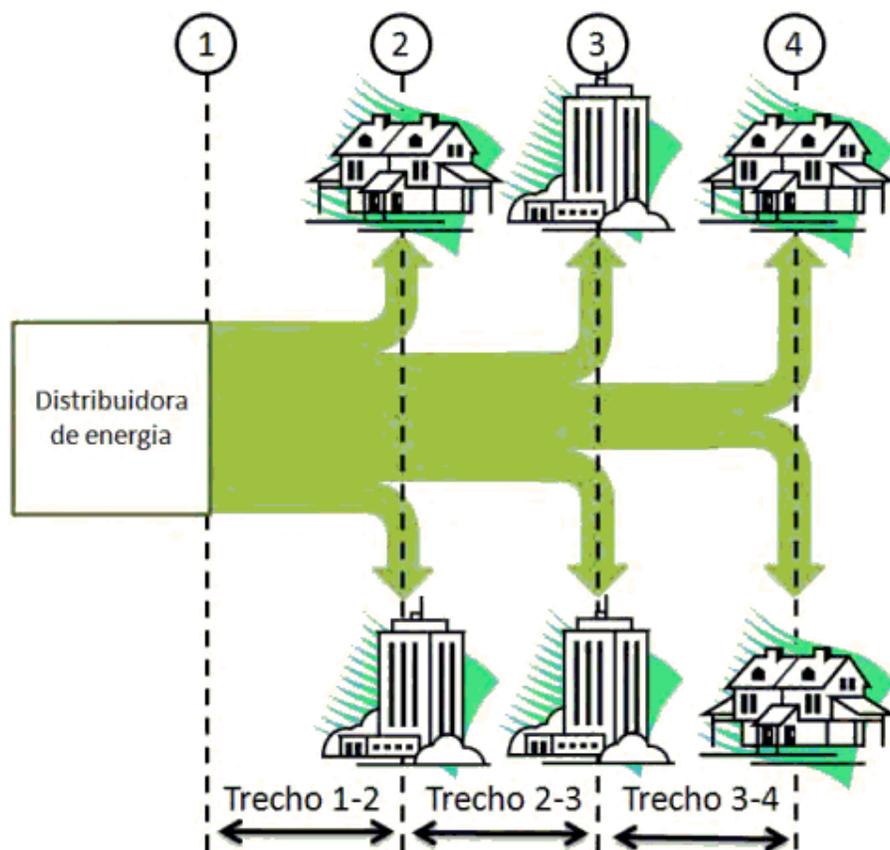
Além de todos esses fatores, pode-se citar que a matriz energética europeia tem como base os combustíveis fósseis e, deste modo, fazem-se necessários investimentos em alternativas sustentáveis de energia, como é o caso da microgeração.

A companhia Energias de Portugal (EDP) tem trabalhado em prol da microgeração na Europa. Na cidade portuguesa de Évora, através do projeto de eficiência energética denominado InovCity, a cidade recebeu uma rede inteligente de energia, potencializando a eficiência energética, a microgeração e a mobilidade elétrica. Todo cliente recebe um medidor de energia eletrônico, o qual foi nomeado pela empresa portuguesa como EDP Box. Este equipamento é capaz de: fazer leituras e operações remotamente, facilitar a detecção e solução de falhas no sistema, possibilitar a comercialização da energia e, além disso, permitir ao cliente utilizar a energia elétrica em um período no qual o preço seja mais favorável (EDP, 2013).

A utilização da microgeração possibilita uma mudança importante no sistema de distribuição de energia. Antes este era centralizado, como mostra a Figura 2.1, e com a

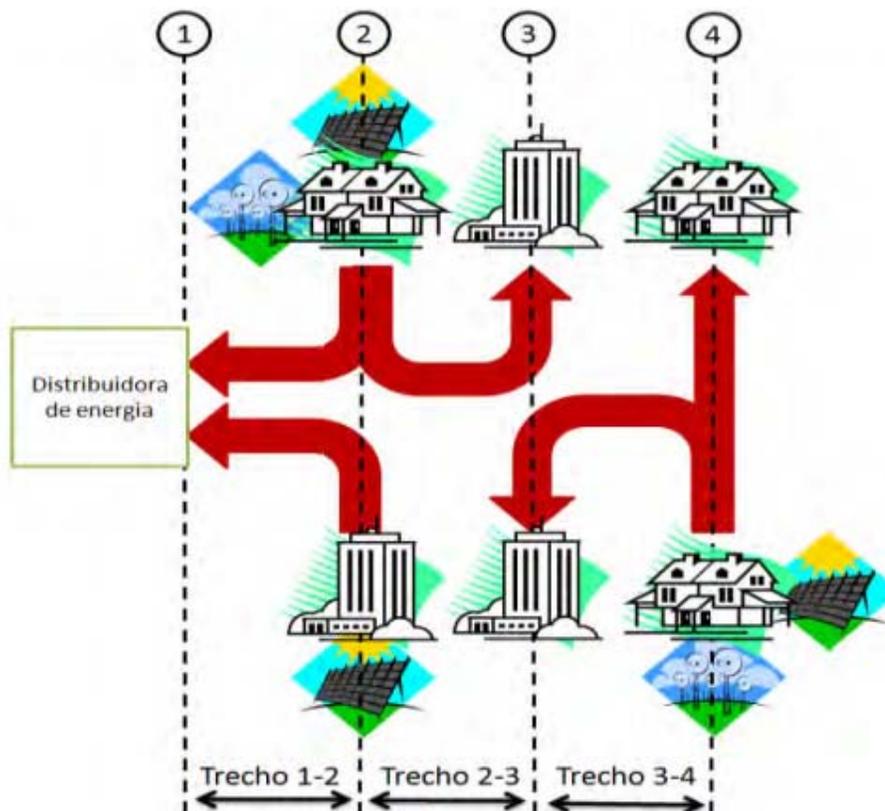
introdução da geração distribuída, geração de energia elétrica realizada junto ou próximo do consumidor (INEE, 2013), passa a ser descentralizada, ou seja, anteriormente, o fluxo de potência de um alimentador era sempre unidirecional, da fonte em direção às cargas. Atualmente em um sistema que faz o uso de geração distribuída, o fluxo de potência não é mais necessariamente unidirecional e a subestação da distribuidora pode até receber ao invés de fornecer potência, como ilustrado na Figura 2.2 (CELG,2013).

Figura 2.1- Distribuição centralizada de energia elétrica



Fonte: (CELG, 2013)

Figura 2.2 – Distribuição descentralizada de energia elétrica.



Fonte: (CELG, 2013)

Deste modo, a criação de um sistema descentralizado gera uma série de impactos na distribuição de energia elétrica, os quais exigem uma reformulação de todo o sistema, principalmente a partir do momento em que a potência alcançada pela geração distribuída atingir 20% da geração total, dificultando o controle, integração e operação deste (ONS, 2013).

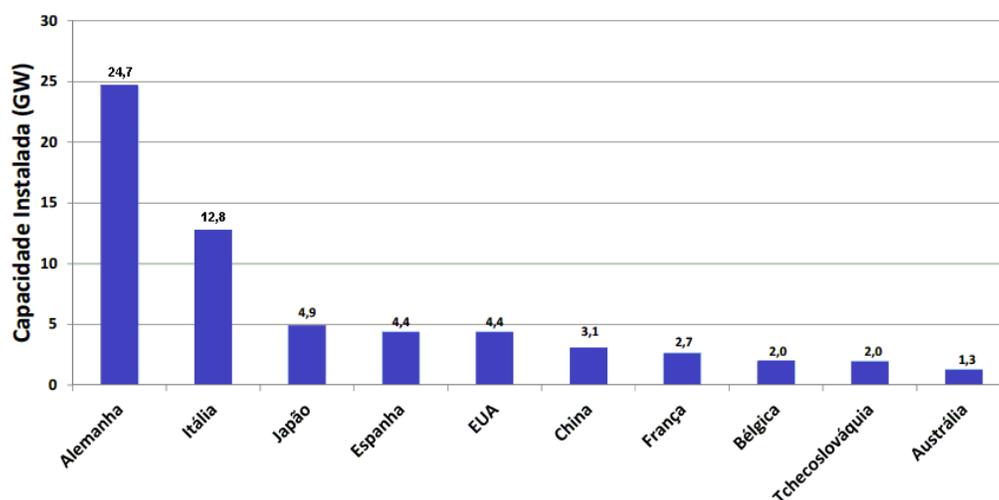
Os impactos supracitados estão intimamente ligados ao acesso que os módulos de microgeração residenciais terão à rede de baixa tensão e como os órgãos reguladores estipularão regras para que os antigos consumidores e atuais produtores de energia não poluam a rede de acordo com os critérios de qualidade de energia.

Além disso, outros impasses como o custo da instalação de um projeto de microgeração tem impedido muitos consumidores de implementarem a iniciativa sustentável. O preço dos painéis solares tem impedido o cidadão norte americano de os instalarem em suas residências,

já na Europa incentivos do governo e um plano ambicioso de metas tem alavancado a utilização desta tecnologia para uso residencial. Em 2010 a Alemanha instalou 7400 MW através de sistemas fotovoltaicos, dos quais 700 MW foram provenientes de cem mil residências (SOLAR-POWERED HOMES REMAIN A DISTANT DREAM FOR MANY IN THE US, 2011).

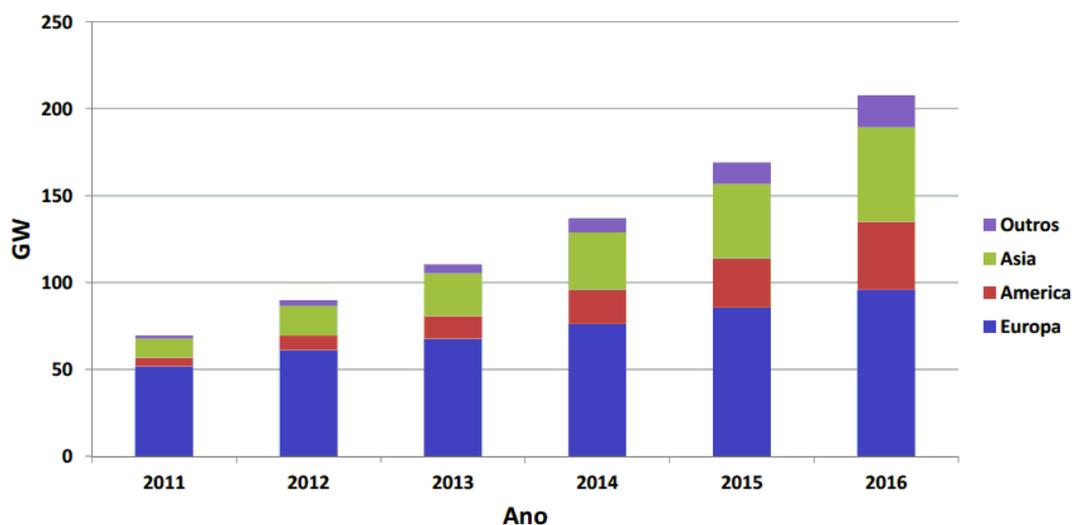
A Figura 2.3 apresenta os países que mais investiram em produção de energia elétrica solar e a Figura 2.4 exibe uma perspectiva da utilização de tal tecnologia.

Figura 2.3 - Países que mais produziram energia elétrica utilizando-se de painéis solares.



Fonte: (European Photovoltaic Industry Association (EPIA), 2012).

Figura 2.4 – Previsão da capacidade instalada de painéis solares no mundo.



Fonte: (European Photovoltaic Industry Association (EPIA), 2012).

Em consonância com a microgeração surge a possibilidade de se instalar microrredes CC, pois fontes de energia como a eólica, solar e as células a combustível geram uma grandeza CC. O assunto, mais uma vez, está mais evoluído nos países do hemisfério norte, principalmente nos Estados Unidos e países do continente europeu.

A utilização de microrredes CC para alimentar *Data Centers* está sendo utilizada como uma solução para o uso eficiente de energia, já que são discriminadas as perdas com as conversões de energia. Além disso, há alguns desafios para implantação das microrredes CC, tais como a necessidade de mão-de-obra especializada, o dimensionamento de cabos, o qual será diferente daquele utilizado para aplicações em CA, e solucionar o problema dos arcos voltaicos formados nas tomadas CC quando uma carga é desconectada (CRONSHAW, 2013).

Ademais, as universidades norte americanas vêm investindo em microrredes em seus campi através de programas para auxiliar as universidades a alcançarem seus objetivos no que diz respeito à sustentabilidade (BARNES, 2013).

Algumas empresas da área de eletrônicos já estão direcionando seus investimentos em produtos que se encaixam no perfil de microrredes. Segundo Stelts (2010), a Panasonic tem um projeto nomeado “eco ideas HOUSE”, no qual são produzidos equipamentos eficientes para poupar energia (eletrodomésticos), dispositivos que geram energia (painéis solares, células a combustível), produtos de armazenamento de energia (baterias) e instrumentos de gerenciamento de energia.

Para que as redes CC possam ser implementadas para uso residencial associadas a um módulo de microgeração será necessária a criação de um padrão e de um mercado que possibilite a inserção de dispositivos eletrônicos nessa rede.

2.3 PANORAMA NACIONAL DA MICROGERAÇÃO E DAS MICRORREDES CC

A arquitetura do sistema elétrico brasileiro, bem como o europeu, privilegiam um tipo de geração, no Brasil usinas hidrelétricas e na Europa termelétricas.

As grandes usinas hidrelétricas são as principais geradoras de eletricidade no Brasil. A maior parte da matriz nacional está concentrada nessa fonte e os planos de expansão da geração de energia também privilegiam a construção de grandes usinas. Apesar de ser conhecida como uma fonte de energia limpa com baixos níveis de emissão de gases de efeito estufa, as usinas hidrelétricas de grande porte causam grandes impactos sociais e ambientais (WWF, 2012).

Contudo, com o passar dos anos o projeto de grandes hidrelétricas tornou-se uma espécie de inimigo do meio ambiente e da sociedade, fato que tem impedido ou postergado alguns projetos, como caso da usina de Belo Monte no norte do país. Deste modo, buscaram-se alternativas para equilibrar na mesma balança: energia, sustentabilidade e inclusão social.

É este cenário que a microgeração encontra pela frente no país e já deu importantes passos para viabilização desta no país. A criação da Resolução Normativa nº 482 de 2012 e a mais recente nº 517 pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) ditam as regras para aqueles que desejam instalar módulos de microgeração em suas residências. Além de estabelecer os procedimentos gerais para a conexão à rede de mini e microgeradores, a resolução propõe a criação de um sistema de compensação de energia, conhecido internacionalmente como *net metering*.

As resoluções abriram as portas do país para a microgeração, contudo, de acordo com Spatuzza (2012), o assunto ainda gera muitas dúvidas na população e há pouco investimento nacional em tecnologia para implementação deste tipo de projeto, no qual grande parte dos dispositivos utilizados é importada.

De acordo com Canazio (2013), o ideal seria que se tivesse uma linha especial de crédito para incentivar a aquisição dos equipamentos pelos consumidores, tendo em vista o alto custo destes, fator que ainda limita a quantidade de consumidores que aderem ao projeto.

Contudo, mesmo com todas as restrições impostas, a microgeração é vista com bons olhos pelas companhias de distribuição de energia elétrica, pois além de ser uma fonte limpa de energia, sua utilização em massa, através do conceito de redes inteligentes, pode ser capaz de adiar os investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão (BRASIL, 2010).

A pressão da ANEEL, através de resoluções, para que as distribuidoras de energia comecem a mudar os medidores eletromecânicos de energia para eletrônicos, no caso de clientes que optem pela tarifa branca¹, proporcionará um avanço na instalação de módulos de microgeração, pois os medidores eletrônicos permitem a integração desta com a rede elétrica que é, atualmente, a única maneira de se implantar técnicas de microgeração no país.

As microrredes CC não são contempladas nas resoluções e é um assunto ainda em estudo no Brasil, alvo de trabalhos acadêmicos e especulações. Além disso, o mercado de eletrônicos teria que ser reformulado para que microrredes CC residenciais se tornassem aptas ao uso.

¹ tarifa branca disponibiliza preços diferenciados de acordo com o horário de consumo.

2.4 TENDÊNCIAS

A microgeração em conjunto com um sistema de microrrede CC pode ser considerada uma tendência para residências e prédios comerciais, principalmente nos países que já desfrutam de redes inteligentes de medição de energia através dos medidores eletrônicos.

Empresas, como a japonesa Panasonic, já estão investindo em produtos para facilitar a utilização de redes CC.

A criação de padrões que tratam sobre nível de tensão, cabeamento e tomadas, além da produção de equipamentos específicos para esse mercado alavancará projetos de microrredes CC e estes causarão uma redução significativa na conta de energia, pois iluminação, aparelhos eletrônicos e até cargas mais pesadas como chuveiros e ar condicionados poderão ser alimentados por tomadas CC, cuja fonte de energia está em um módulo de microgeração.

3 ASPETOS CONCEITUAIS

3.1 INTRODUÇÃO

Já houve no passado, mais precisamente no fim do século XIX, o questionamento sobre o uso de corrente alternada, apoiada George Westinghouse e Nikola Tesla, ou corrente contínua, defendida por Thomas Edison, para distribuição de energia elétrica. Nessa disputa, a distribuição em corrente contínua foi deixada para trás devido à invenção do transformador. Esse equipamento era capaz de variar os níveis de tensão e, deste modo, facilitava a transmissão de energia, contudo seu uso era restrito aos sistemas em corrente alternada (SANTOS, 2011).

Nos dias de hoje, com as malhas de transmissão e distribuição estruturadas e em sua maioria utilizando os conceitos de corrente alternada, volta-se ao questionamento das correntes, contudo, em uma esfera completamente diferente daquela na qual estavam inseridos Tesla e Thomas Edison.

Primeiramente, levando em consideração as redes CC residenciais, não haverá a necessidade de transmiti-la por longas distâncias, fato que viabiliza sua utilização. Outro ponto abordado é a questão energética mundial, que sofre cada vez mais restrições e em contrapartida o consumo de energia continua a crescer. Deste modo, pequenos projetos, como o caso das microrredes que atinjam a uma grande massa, podem atuar como medidas paliativas até que outra definitiva seja tomada. Além disso, essas ações podem educar e alertar a população sobre o uso sustentável de energia elétrica.

3.2 TOPOLOGIA

A ausência de padrões para as microrredes tem sido um empecilho para a área. Até que se encontre um conjunto de regras que viabilizem a instalação, estudos são direcionados para mostrar as possibilidades existentes.

O valor da tensão nominal é o primeiro item a ser discutido. Este valor não pode ser muito pequeno, pois deste modo, a corrente torna-se grande, visto que, segundo a equação (3.1), para um mesmo valor de carga P [W], a diminuição do valor da tensão faz a corrente crescer.

$$P = U.I \quad (3.1)$$

Deste modo, através dos dados elencados na Tabela 3.1, é possível obter valores de correntes para diferentes valores de tensão.

Tabela 3.1 – Consumo de aparelhos televisores.

	Consumo (W)	Tarifa Mensal (R\$)	Tarifa Anual (R\$)
Tubo 14"	40 - 70	2,40 - 4,20	50,4
Tubo 29"	80 - 110	4,80 - 6,60	79,2
LCD 22"	38 - 75	2,28 - 4,50	54
LCD 42"	200 - 250	12,00 - 15,00	180
Plasma 42"	240 - 320	14,40 - 19,20	230
Plasma 50"	330 - 585	19,80 - 35,04	420,48
LED 32"	95	5,7	68,4
LED 46"	155 - 175	9,30 - 10,50	126
LED 55"	195 - 260	11,70 - 15,60	187,2

Fonte: (PRADA, 2010)

Ao considerar valores de tensão de 60 VCC, 48 VCC e 24 VCC para uma potência média de 225 W (televisor LCD 42"), tem-se os seguintes valores de corrente:

- 60 [VCC] – 3,75 [A];
- 48 [VCC] – 4,69 [A];
- 24 [VCC] – 9,36 [A].

Lembrando que para a configuração em corrente alternada, para 127 [VCA] tem-se um valor de 1,77 [A] e para 220 [VCA] obtém-se o resultado de 1,02 [A].

Estes dados ilustram um dos desafios encontrados para a utilização de uma rede em corrente contínua: o dimensionamento dos cabos.

3.2.1 Dimensionamento de cabos em corrente contínua

Uma das dificuldades encontradas no dimensionamento de cabos para corrente contínua é que estes estão sujeitos à ação de forças de natureza eletromagnéticas (correntes paralelas de

sentido inverso) e, além disso, o aquecimento pelo efeito Joule limita a condução de corrente através do cabo, pois o aumento da temperatura no condutor implica na agitação térmica dos elétrons, que por sua vez resulta no aumento da resistência elétrica para uma mesma diferença de potencial imposta ao cabo.

Para dimensionar a secção dos cabos utilizados em CC, é necessário levar em consideração as perdas resistivas. A norma alemã VDE 0100 Parte 712 (1998), indica que a queda de tensão máxima admissível (e) no cabo não deve atingir de 3 % da tensão nominal para aplicações em corrente contínua. Para o cálculo da secção transversal do condutor são utilizados os parâmetros mostrados na Tabela 3.2 (CARNEIRO, 2009).

Tabela 3.2 – Parâmetros para dimensionamento dos cabos em CC.

Parâmetros Elétricos	Símbolo	Unidade
Comprimento do cabo (condutor positivo +negativo)	L	m
Secção transversal do cabo	S	mm ²
Condutividade elétrica	σ	m/(Ω .mm ²)
Tensão Nominal	U	V
Corrente Nominal	I	A
Queda de Tensão Máxima	e	V
Potência	P	W

Dispondo dos parâmetros apresentados na Tabela 3.2 e utilizando a equação (3.2), é possível calcular a secção do cabo utilizado no projeto.

$$S = \frac{L \cdot P}{\sigma \cdot e \cdot U^2} \quad (3.2)$$

Para efeito de cálculo, supondo alimentar apenas o aparelho televisor (250 W), sendo:

- $L = 40 \text{ m}$
- $\sigma_{\text{CU}} = 56 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$
- $e = 3\%$

é possível calcular as respectivas secções transversais dos cabos.

- 60 VCC

$$S = \frac{40.250}{56.0,03.60^2}$$

$$S = 1,65 \text{ mm}^2$$

- 48 VCC

$$S = 2,58 \text{ mm}^2$$

- 24 VCC

$$S = 10,33 \text{ mm}^2$$

Os valores obtidos apenas ilustram o aumento da corrente com a diminuição da tensão e, conseqüentemente, aumento da seção transversal dos cabos. Para o dimensionamento correto é necessário levantar a carga instalada da residência, dividir os circuitos que irão atender às cargas e dimensionar o comprimento dos cabos.

A variação da seção transversal com o valor da tensão nominal do projeto sugere que especial atenção deve ser dada a este ponto. Para que os valores de seção transversal não assumam grandezas que inviabilizem o projeto, é necessário adotar critérios que o tornem factível. A priori, elevar o valor da tensão nominal é o mais óbvio, contudo deve-se averiguar qual o valor de tensão de saída fornecido pelo módulo de microgeração utilizado. Outra abordagem seria dividir o projeto em uma quantidade maior de circuitos, a fim de diminuir o valor da carga instalada (W) para cada circuito e, deste modo, reduzir a seção transversal do condutor.

3.2.2 Sistema de proteção e acessórios

Equipamentos aprovados para serem utilizados em regime de corrente alternada podem não ser adequados para o uso em corrente contínua, principalmente dispositivos de chaveamento. Isso se deve ao fato de, ao desconectar uma carga, retirando o plugue de uma tomada CC ou até mesmo desligá-la através de um interruptor, pode-se ocasionar um arco voltaico, fenômeno que ocorre quando uma diferença de potencial entre dois terminais próximos, porém não conectados fisicamente, é capaz de vencer a rigidez dielétrica do ar e ionizá-lo, resultando em um fluxo de elétrons através deste. Em regime de corrente contínua os arcos voltaicos são mais difíceis de extinguir quando comparados com corrente alternada, pois não há uma passagem natural pelo zero como nas cargas CA (CRONSHAW, 2013).

Deste modo, por questões de segurança, os dispositivos de proteção devem ser precisos e apropriados para o uso em regime de corrente contínua.

Em uma residência ou prédio comercial que faça o uso de uma microrrede CC existem cargas sensíveis que não podem ser interrompidas, ou caso sejam, deve ser por um curto período de tempo. Tais cargas podem ser do tipo:

- Iluminação;
- Sistemas de dados e comunicações;
- Sistemas de segurança;
- Sistemas de controle de temperatura;
- Equipamentos médicos.

Assim, faz-se necessário o uso de baterias que forneçam suporte ao sistema quando este não é capaz de suprir as cargas essenciais. Isso pode acontecer de diversas maneiras: considerando-se um painel fotovoltaico, os dias de chuva poderiam afetar a microgeração e assim, às cargas prioritárias. Já para os aerogeradores eólicos, a falta de ventos em determinado período do ano poderia prejudicar a microgeração. O pior caso seria quando o módulo de microgeração não fosse capaz de fornecer energia e, além disso, houvesse uma falta na rede CA. Em situações como estas, a presença da bateria seria responsável por manter o sistema funcionando, basicamente para atender àquelas cargas que não podem ser interrompidas. Além disso, é necessário que a microrrede tenha um sistema que detecte qualquer tipo de falta na rede CA e desconecte-se desta (*island mode*), pois nestas circunstâncias, se o sistema de microgeração estiver conectado à rede CA, este tentará

energizá-la, podendo ocasionar algum acidente com os servidores das concessionárias de energia, por exemplo.

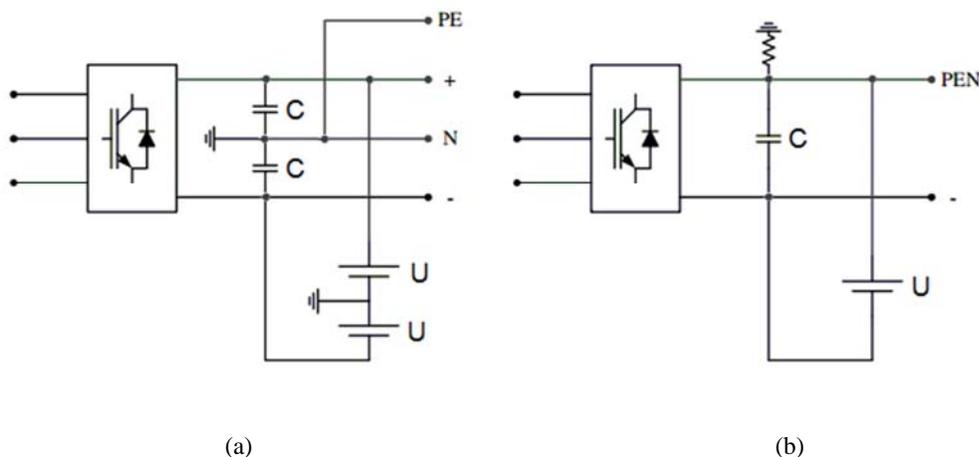
O sistema de proteção para um sistema de baixa tensão em corrente contínua consiste, basicamente, em sistema de aterramento, dispositivos de proteção (interrupção de corrente), relés de proteção e equipamentos de medição.

3.2.2.1 Sistema de aterramento

Aterramento é um assunto complexo e há muitas abordagens para desenvolver um esquema de aterramento em sistemas de distribuição de energia elétrica. O aterramento é utilizado, essencialmente, para detecção de falhas de terra e proteção de equipamentos e das pessoas que estão próximas aos dispositivos do sistema de distribuição.

Neste estudo, são abordados dois esquemas de aterramento: TN-S e IT, ambos apresentados na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Arranjos de aterramento: (a) TN-S; (b) IT.



Fonte: (SALOMONSSON, 2008)

O esquema TN-S tem o ponto central do conversor e da bateria conectados ao terra (T), e cabos separados (S) são usados para todo o sistema de neutro (N) e proteção de terra (PE). Já o esquema IT tem o polo positivo conectado à terra através de uma impedância (I).

A utilização do modo TN-S resulta, no caso de uma falta para terra, em uma grande corrente de terra e um grande transitório de tensão sobre os capacitores localizados entre o

neutro e os polos positivo e negativo. Esta tensão pode afetar outras cargas conectadas ao polo que sofreu a falta; contudo, as cargas conectadas no outro polo não sofrerão dano algum. A falta é facilmente detectada e pode ser rapidamente resolvida. Deste modo, o sistema TN-S fornece uma tensão bem definida de um polo para terra e caminhos para as correntes parasitas.

No entanto, o sistema IT apresenta pequenas correntes e tensões transitórias no caso de uma falta para terra. Isto garante uma operação estável das cargas durante a falta. Contudo, a falta para terra muda a diferença de potencial do polo para terra o que pode afetar às cargas eletrônicas sensíveis. Devido aos baixos valores da corrente de falta, é complicado medir e detectar a falta (SALOMONSSON, 2008).

3.2.2.2 Dispositivos de Proteção

Os dispositivos de proteção disponíveis para uso em corrente contínua são, basicamente: fusíveis, disjuntores em caixa moldada e disjuntores de potência para baixa tensão. Alguns desses componentes são especialmente desenvolvidos para corrente contínua, mas a maioria pode ser utilizada também para aplicações em corrente alternada.

O fusível consiste de um filamento de metal com baixo ponto de fusão, que se funde por efeito Joule, ao ser percorrido por um determinado valor de corrente acima dos valores normais de operação do circuito. Ao fundir o material um arco voltaico será formado e na ausência do zero natural em um sistema de corrente contínua, é utilizado um sistema de resfriamento para extinguir mais rapidamente o arco.

O disjuntor em caixa moldada consiste de um contator, uma câmara de extinção e um dispositivo de disparo. Quando este disjuntor é acionado, seus contatos começam a se separar dando origem a um arco entre seus terminais. O arco é forçado para dentro da câmara de extinção por pressão do ar e forças magnéticas. A câmara de extinção consiste em várias placas de metal que foram desenvolvidas para dividir o arco em pequenos arcos.

Os disjuntores em caixa moldada são, geralmente, termo-magnéticos. O disparo magnético sente o valor instantâneo da corrente, o que significa que para aplicações em CC o valor da corrente nominal é $\sqrt{2}$ vezes maior que em CA, tendo em vista que o valor de tensão eficaz (V_{ef}) se relaciona com a tensão de pico (V_p) segundo a equação (3.3). Todavia, para o disparo térmico os valores são os mesmos.

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (3.3)$$

Há alguns problemas conhecidos associados tanto com os fusíveis quanto com os disjuntores para aplicações em corrente contínua. Entretanto aquele que mais causa problemas nas instalações é o tempo gasto para extinguir o arco voltaico. Utilizando componentes de eletrônica de potência como o *gate-turn-off thyristor* (GTO) é possível reduzir tal tempo, porém, as perdas no circuito aumentarão consideravelmente. Estudos para reduzir essas perdas estão sendo feitos (SALOMONSSON, 2008).

3.2.2.3 Relés de proteção e equipamentos de medição

Disjuntores são equipados com dispositivos mecânicos instantâneos de disparo que podem abrir o circuito caso a corrente que passa através dele exceda um determinado valor pré-estabelecido. A força eletromagnética gerada por essa corrente é usada para abrir o disjuntor. Contudo, se o disjuntor precisar ser aberto por outros eventos, um relé de proteção será necessário.

Relés de proteção usam informações de tensões e correntes medidas no sistema, e em alguns casos também utilizam informações recebidas de outras unidades através de sistemas de comunicação. Vale ressaltar que os instrumentos de medição devem ser capazes de lidar com valores CC para se obter resultados ótimos.

3.2.2.4 O sistema de proteção

A principal função de um sistema de proteção é detectar e isolar faltas de maneira rápida e precisa, a fim de minimizar os efeitos causados pelas perturbações no sistema. O projeto de um sistema de proteção depende de algumas questões: o tipo de falta que pode ocorrer, suas consequências, o tipo de dispositivos de proteção necessários, métodos de detecção de falta, medições para prevenção de faltas e, finalmente, medições para evitar a operação incorreta do sistema.

A grande diferença entre uma microrrede CC e os outros sistemas de distribuição CC é o tipo de conversor que é utilizado para conectar a rede CC com a rede CA. Conversores utilizados, por exemplo, em subestações, unidades geradoras ou aplicações que necessitam de maior potência, são projetadas para ter um fluxo de potência apenas do lado CA para CC.

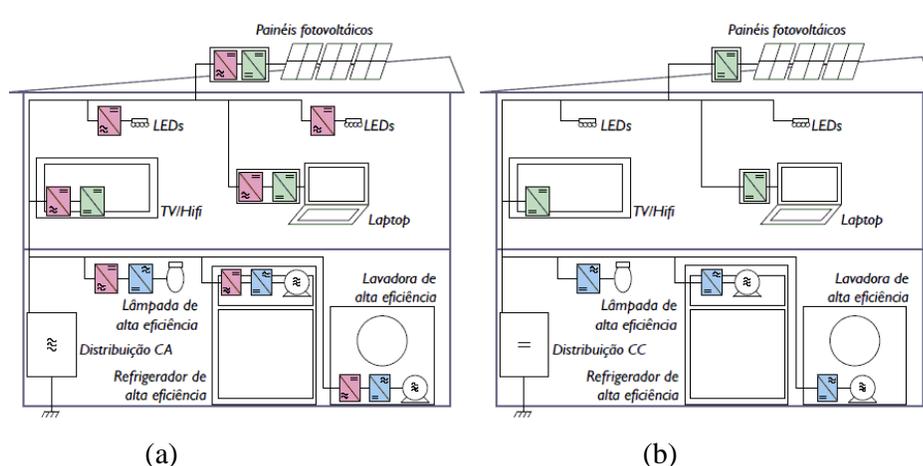
Embora o fluxo de potência em um conversor para microrredes CC seja bidirecional, pode não ser possível limitar a corrente através do conversor durante a falta do lado CC. No momento da falta, todas as fontes de armazenamento de energia contribuirão para a corrente total de falta.

Deste modo, os componentes de uma microrrede CC devem estar devidamente protegidos de curtos-circuitos e sobretensões. Dependendo da sensibilidade dos equipamentos diferentes abordagens podem ser seguidas. Os conversores são muito sensíveis à curtos-circuitos e se estes dispositivos não possuírem limitadores de correntes faz-se necessário o uso de dispositivos rápidos para interrupção de corrente. Já as baterias não necessitam de proteções rápidas, e componentes mais simples e baratos podem ser utilizados, como por exemplo, disjuntores e relés comuns (SALOMONSSON, 2008).

3.2.3 Arranjos

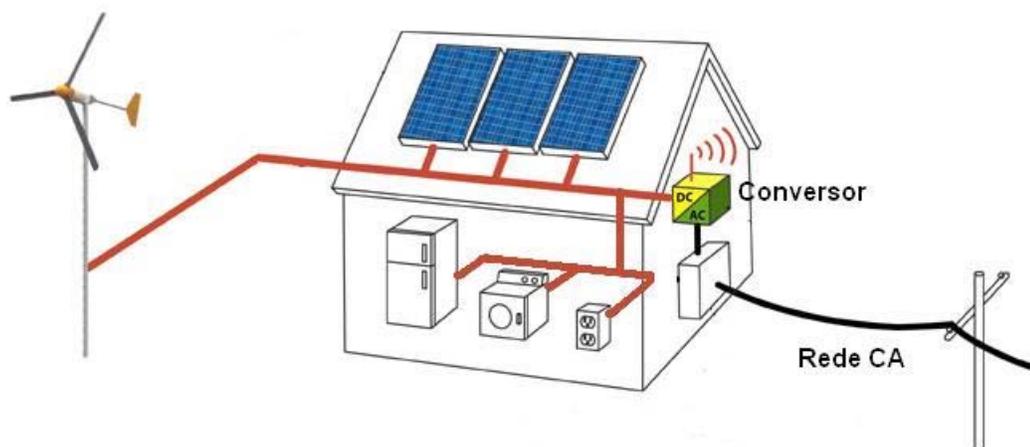
Os módulos de microgeração podem ser conectados a um conversor CC/CA e, a partir deste ponto, alimentar com uma tensão alternada todas as cargas de uma residência, como mostrado na Figura 3.2 (a). Todavia, é exatamente essa conversão que se deseja evitar, devido às perdas associadas a tal operação. Assim, a Figura 3.2 (b) ilustra uma residência na qual é utilizada uma microrrede CC. Além disso, percebe-se que alguns conversores, que até então estavam associados às cargas, tornam-se desnecessários em uma rede de distribuição CC, por exemplo, os conversores CA/CC conectados à geladeira e à lavadora.

Figura 3.2 – Configurações para uma rede residencial: (a) em CA; (b) em CC.



Outro arranjo possível é aquele no qual o módulo de microgeração está conectado às cargas dentro da residência e também à rede, aumentando assim a confiabilidade da instalação.

Figura 3.3 – Microrrede CC conectada a rede.

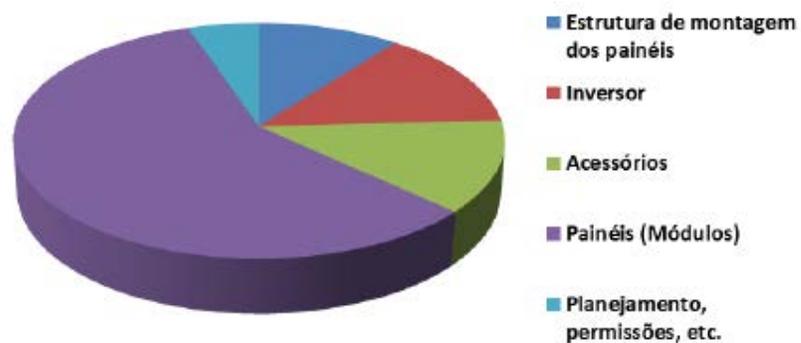


Fonte: (REBUS, 2013)

Na configuração exposta na Figura 3.3 é necessária a instalação de um medidor eletrônico e bidirecional de energia, pois a residência pode se comportar ora como consumidora ora como geradora de energia elétrica. Segundo a legislação brasileira, todos os custos com os módulos de microgeração, sejam eles painéis fotovoltaicos, aerogeradores eólicas ou células a combustível, ficam vinculados ao proprietário da unidade consumidora. Para uma geração de 2 kW, suficiente para suprir a média de consumo nacional, 250 kWh/mês, é necessário um investimento de dezessete mil reais a vinte mil reais e o retorno do investimento é previsto para ser atingido em nove anos (BRASILSOLAIR, 2013).

Segundo a ANEEL (2012), o custo de um projeto de microgeração, especificamente através de painéis solares, está sob responsabilidade dos próprios painéis e dos inversores, os quais juntos representam, em média, 70% do custo total do projeto. A Figura 3.4 faz uma comparação entre os custos dos componentes primordiais envolvidos no projeto.

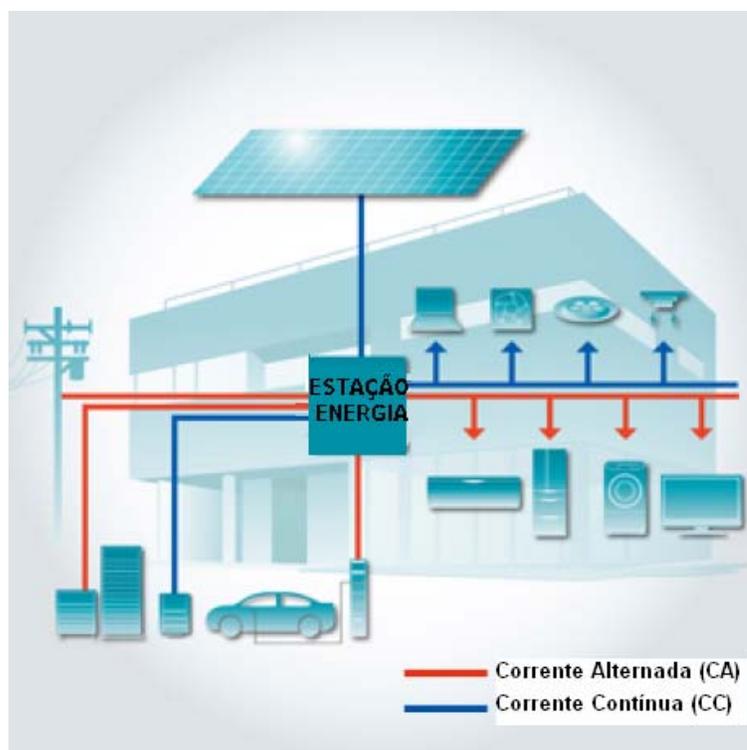
Figura 3.4 – Custos de um projeto de microgeração solar.



Fonte: (ANEEL, 2012)

Outra topologia que pode ser implementada é a híbrida. Nesta configuração coexistem, uma rede CC e uma rede CA na residência, como apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Topologia Híbrida.

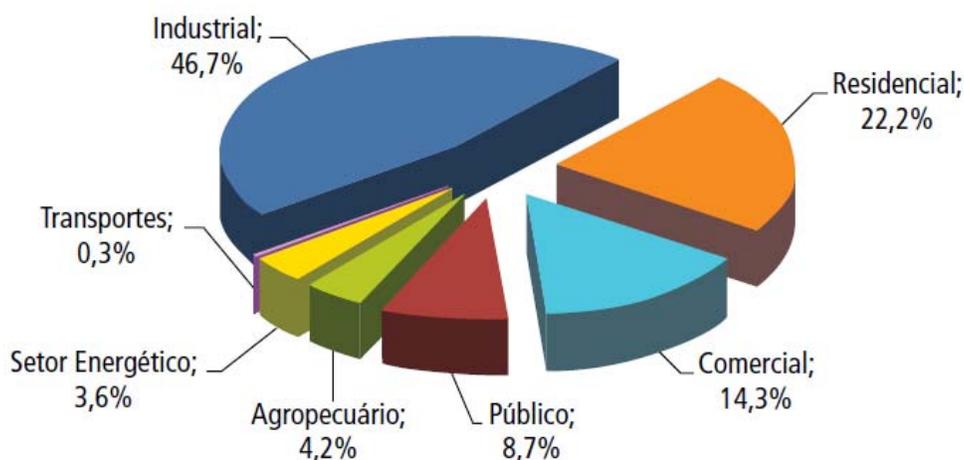


Fonte: (STELTS, 2010)

3.3 VANTAGENS

Dentro da malha de consumo de energia elétrica no Brasil, um quinto deste está sob responsabilidade das residências como se observa na Figura 3.6. Neste cenário, vê-se a importância de medidas que tornem o consumo residencial consciente. Além disso, a utilização de microrredes atinge exatamente este nicho e, deste modo, a primeira vantagem se caracteriza com a redução do consumo de energia elétrica.

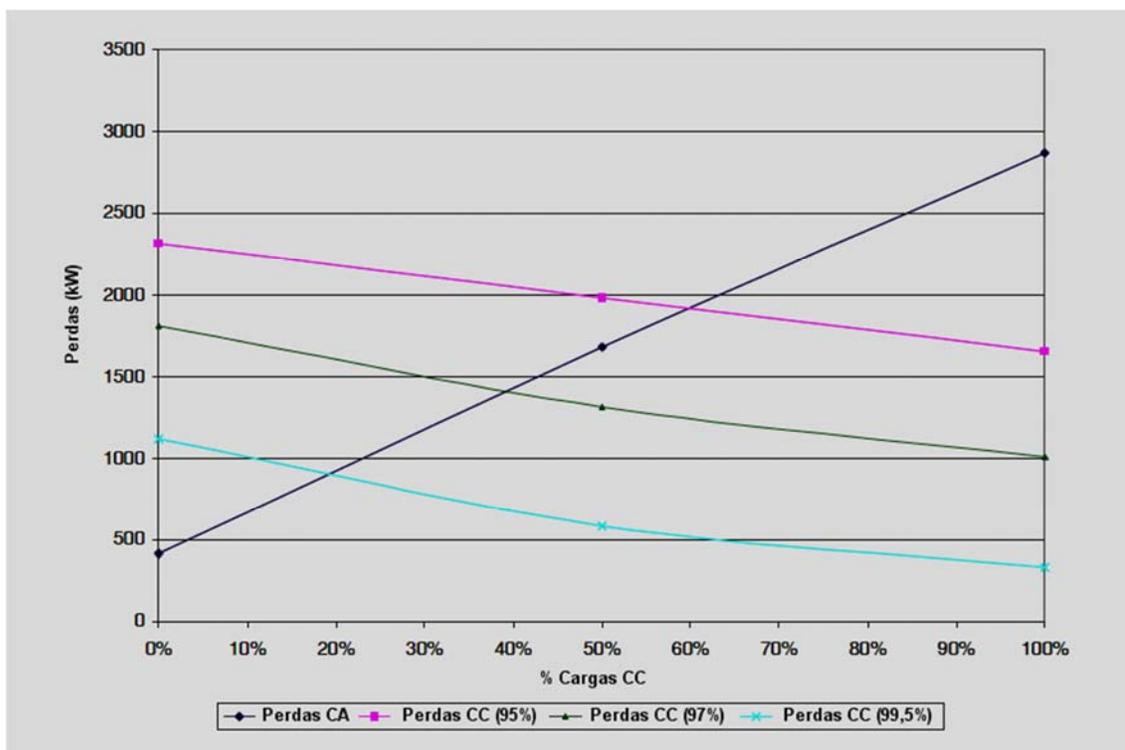
Figura 3.6 – Consumos setoriais de energia elétrica referentes a 2005.



Fonte: (ELETROBRAS, 2007)

Outra vantagem a ser citada é a redução das perdas do sistema de distribuição quando comparado com a distribuição em CA. Isso significa que para uma determinada demanda, menos energia deve ser gerada para supri-la. Isto implica, indiretamente, em uma redução do impacto ambiental causado pelas fontes não renováveis de energia. A Figura 3.7 ilustra a comparação entre as perdas em uma rede CC e CA com o aumento percentual das cargas. Para os projetos que utilizam correntes contínuas, as perdas diminuem com o aumento das cargas em regime CC, ao passo que o aumento de cargas CC em um projeto que utiliza corrente alternada também aumenta o valor das perdas.

Figura 3.7 – Comparação de perdas em redes CC e CA.



Fonte: (STARKE, 2008)

Com a utilização de um sistema CC, fontes renováveis de energia podem ser mais facilmente incorporadas neste sem a necessidade dos processos de conversão, auxiliando, assim, uma maior redução nas perdas causadas por essa atividade.

Além disso, com a utilização de baterias de armazenamento, a confiabilidade da rede aumenta, pois, em casos de faltas, o sistema de armazenamento pode manter o fornecimento contínuo.

Somado a todas essas vantagens, o desenvolvimento de tecnologias de cabos supercondutores para corrente contínua diminuirá mais ainda as perdas e aumentará a capacidade de condução do sistema (MUSTAFA, 2012).

Problemas com correntes harmônicas também são eliminados com correntes contínuas, já que essas se originam das deformações causadas no sinal CA periódico devido às cargas não lineares. Como uma corrente CC não apresenta características periódicas, tal situação não ocorrerá e, deste modo, a qualidade de energia de um sistema CC também é maior se comparado com CA (SALOMONSSON, 2008).

Mesmo com tantos pontos a favor de uma microrrede CC sua implementação não é comum devido a fatores como:

- Ausência de padrões e legislação específica;
- Falta de mão de obra qualificada;
- O mercado ainda não está preparado para fornecer equipamentos e produtos, em grande escala, para microrredes CC;
- Poucos sistemas pilotos foram desenvolvidos até então;

4 APLICAÇÃO

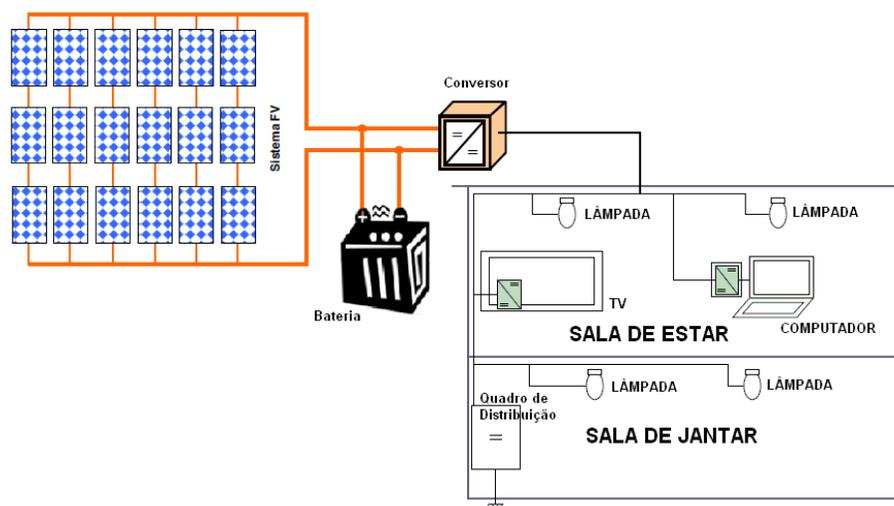
4.1 INTRODUÇÃO

Um sistema de distribuição em corrente contínua, aliado a um módulo de microgeração oferece benefícios, tanto para as residências quanto para as concessionárias e sistema elétrico: para as residências a economia de energia e, conseqüentemente, queda nos gastos. Para as concessionárias e sistema elétrico, esse tipo de projeto age no sentido de aliviar o fluxo de carga e evitar o uso de geração de energia através de fontes poluentes.

4.2 SISTEMA A SER ANALISADO

Para o estudo será utilizado um conjunto de painéis solares conectados a uma rede CC residencial. A tensão de saída dos painéis solares deve passar por um conversor CC / CC para tensão ser regulada a um valor apropriado para alimentar a microrrede CC. Além disso, é empregada uma bateria no sistema para assegurar a alimentação nos períodos em que o recurso solar não está disponível. Um esquemático é mostrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Módulo de microgeração fotovoltaica aliado à uma microrrede CC.



Fonte: (CARNEIRO; HELDWEIN, 2009)

É importante ressaltar que as baterias depois de carregadas são desligadas do sistema e, deste modo, permitem que o mesmo seja alimentado pela tensão gerada pelos painéis.

4.2.1 Dimensionamento do Sistema Fotovoltáico

A primeira tarefa implica em examinar as cargas a serem atendidas pela rede, bem como suas respectivas potências e tempo de uso. A Tabela 4.1 mostra as cargas escolhidas e os dados necessários para o dimensionamento dos painéis.

Tabela 4.1 – Consumo de aparelhos residenciais.

Equipamentos	Quantidade	Horas de uso / dia	Potência (W)	Energia Diária (Wh/dia)
Lâmpada	4	4	15	240
Televisão	1	6	200	1200
Computador	1	4	400	1600
TOTAL			615	3040

Após ter sido feita a estimativa das cargas a serem alimentadas pelos painéis, faz-se necessário avaliar as perdas do sistema.

A capacidade que os painéis solares possuem de alimentar as cargas neles conectadas varia com algumas perdas inerentes ao sistema. As perdas nos cabos e no conversor são as que influenciam expressivamente em tal capacidade (CARNEIRO, 2009).

Utilizando valores típicos tem-se:

- Perdas nos cabos = 3%
- Perdas no conversor = 15 %

Deste modo, o rendimento total do sistema pode ser aproximado de acordo com a equação (4.1).

$$\eta_{cabo} = 0,97$$

$$\eta_{conv} = 0,85 \quad (4.1)$$

$$\eta_{total} = 0,97 * 0,85 = 0,8245$$

O gerador deverá ter uma potência que seja capaz de suprir as necessidades diárias das cargas elencadas na tabela 4.1. Deste modo, a potência P do gerador pode ser calculada conforme a equação (4.2).

$$P = \frac{W_D}{\eta_{\text{total}} * H_S} \quad (4.2)$$

- W_D – Energia diária total
- η – Rendimento total do sistema
- H_S – Horas de sol

Sendo que as horas de sol (H_S) podem ser calculadas através da equação (4.3).

$$H_S = \frac{E(\text{Wh}/\text{m}^2)}{G(\text{W}/\text{m}^2)} \quad (4.3)$$

- E – Radiação global incidente
- G – Irradiância de referência

De acordo com Carneiro (2009), o valor de irradiância (G) utilizado experimentalmente é $1000 \text{ W}/\text{m}^2$.

Segundo Inpe (2006), a radiação global média para a região sudeste é de $5600 \text{ Wh}/\text{m}^2$.

Nestes termos, é possível calcular o valor da Potência P do gerador, utilizando-se das equações (4.2) e (4.3).

$$P = \frac{3040}{0,8245 * \frac{5600}{1000}}$$

$$P = 658,4 \text{ W}$$

Para atender às necessidades das cargas, será selecionado um painel solar modelo MF80 fabricado pela Solarius Lumier. A definição do número de painéis e sua configuração será realizada após o dimensionamento da bateria. O painel possui as seguintes características:

- $P = 80 \text{ W}$
- $V_n = 18 \text{ V}$
- $I_n = 3,8 \text{ A}$

A rede CC será alimentada em uma tensão de 48 V, a fim de não serem necessários valores elevados para seção transversal dos cabos utilizados.

4.2.1.1 Dimensionamento da Bateria

A bateria garante o funcionamento do sistema em situações nas quais a energia solar não está disponível.

De acordo com Seguel (2009), para dimensionar a bateria é preciso calcular consumo diário de corrente através da equação (4.4).

$$I_{\text{dia}} = \frac{W_D}{V_{\text{rede}}} \quad (4.4)$$

$$I_{\text{dia}} = \frac{3040}{48} = 63,33 \text{ Ah}$$

O consumo de corrente corrigido considerando as perdas do sistema está exposto na equação (4.5).

$$I_{\text{dia-corr}} = \frac{I_{\text{dia}}}{\eta_{\text{total}}} \quad (4.4)$$

$$I_{\text{dia-corr}} = \frac{63,33}{0,8245} = 76,81 \text{ Ah}$$

Com este valor foi escolhida a bateria modelo GBS-LFMP100AH, com tensão nominal 24 V e capacidade de 100 Ah.

4.2.1.2 Quantidade de painéis

Ao ser definida a bateria a ser utilizada, é possível calcular a quantidade de painéis que serão necessários no sistema. Primeiramente, calcula-se a quantidade de painéis que serão dispostos em série. De acordo com a equação (4.5), tem-se:

$$N_S > \frac{V_{\text{bat}}}{V_{\text{painel}}} \quad (4.5)$$

$$N_S > \frac{24}{18} = 1,33$$

Logo, serão utilizados 2 painéis em série.

Após calcular a quantidade de painéis conectados em série, faz-se necessário definir, através da equação (4.6), quantas fileiras serão utilizadas no sistema fotovoltaico.

$$N_F = \frac{P}{N_S * V_{\text{painel}} * I_{\text{painel}}} \quad (4.6)$$

$$N_F = \frac{658,4}{2 * 18 * 3,8} = 4,81$$

Portanto, serão utilizados 10 painéis, 5 fileiras com 2 painéis em série cada.

Com a bateria utilizando uma tensão de 24 V e a composição de dois painéis em série atingindo o valor de 36 V, é necessário utilizar um conversor CC-CC que faça a conversão de uma faixa de tensão que varia de 24 V a 36 V na entrada, para obter 48 V na saída. O equipamento escolhido foi um conversor bulk modelo SETDC24/48-60A.

4.2.2 Dimensionamento da Microrrede CC

A microrrede será dividida em 3 circuitos: o circuito 1 alimentará as cargas de iluminação, o circuito 2 o aparelho televisão e o circuito 3 o computador. Desta maneira, as seções transversais dos cabos são reduzidas, pois se reduz também o valor da potência associada ao circuito, ver equação (3.2).

O cabo alimentador irá percorrer o caminho da saída do conversor até o quadro de distribuição CC, estima-se para tal uma distância de 10 m. Logo, a seção do cabo alimentador é definida pela equação (3.2):

$$S = \frac{L \cdot P}{\sigma \cdot e \cdot U^2}$$

$$S = \frac{20 * 615}{56 * 0,03 * 48^2}$$

$$S_{alimentador} = 3,17 \text{ mm}^2$$

Segundo Creder (2008), o valor comercial acima e mais próximo de $3,17 \text{ mm}^2$ é de 4 mm^2 .

Para o circuito 1, avalia-se um comprimento de 30 m (15 m para cada pólo) e a potência das cargas de iluminação contidas na tabela 4.1 igual a 60 W, portanto:

$$S_1 = 0,47 \text{ mm}^2$$

Segundo Creder (2008), o valor comercial acima e mais próximo de $0,47 \text{ mm}^2$ é de $0,5 \text{ mm}^2$, no entanto, a NBR 5410 (ABNT, 2004) estipula um valor mínimo de $1,5 \text{ mm}^2$ para o cabeamento de cargas de iluminação residenciais.

Levando em consideração o circuito 2 que alimentará o aparelho televisor com potência de 200 W e um comprimento estimado em 15 m (7,5 m para cada pólo), obtém-se o seguinte valor de seção transversal:

$$S_2 = 0,77 \text{ mm}^2$$

De maneira semelhante ao circuito 1, é necessário escolher o valor de $2,5 \text{ mm}^2$ para se enquadrar nas diretrizes sugeridas pela NBR 5410 (ABNT, 2004), na qual a seção de $2,5 \text{ mm}^2$ é sugerida para tomadas de uso geral.

Para o último circuito o qual alimentará apenas um computador de 400 W e utilizará um comprimento de 25 m (12,5 m para cada pólo), tem-se o subseqüente valor de seção do cabo.

$$S_3 = 2,58 \text{ mm}^2$$

Logo, para o circuito 3 será utilizado um cabo com seção de 4 mm^2 (valor comercial), da mesma maneira que fora utilizado para o alimentador.

4.3 ANÁLISE DE CUSTOS

Com as informações obtidas é possível fazer uma estimativa dos gastos do projeto, considerando que o sistema de aterramento e as proteções contra sobrecorrentes já tenham sido instalados, sendo necessário, especificamente, o dimensionamento dos painéis e da microrrede CC.

A tabela 4.2 apresenta a quantidade dos materiais e seus respectivos custos.

Tabela 4.2 – Lista de materiais.

Equipamentos	Quantidade	Custo (R\$)
Painel Solar (MF80)	10	5120,00
Bateria (GBS-LFMP100AH)	1	1260,00
Conversor CC-CC (SETDC24/48-60A)	1	1600,00
Cabos Flex (30 m 1,5mm ² , 15 m 2,5 mm ² e 35 m 4mm ²)	-	180,00

Portanto, o custo total do projeto é aproximadamente R\$ 8160,00. Ao comparar-se o preço do projeto com a demanda tem-se o custo da geração C_G . Considerando a vida útil do sistema de aproximadamente vinte anos, calcula-se através da equação (4.7) a demanda D_{20} nesse período. Deste modo, é possível calcular, pela equação (4.8), o valor do C_G do projeto em questão.

$$D_{20} = 20 \text{ anos} \times 365 \frac{\text{dias}}{\text{ano}} \times 3,04 \frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \quad (4.7)$$

$$D_{20} = 22.192 \text{ kWh}$$

$$C_G = \frac{\text{Custo do Projeto}}{D_{20}} \quad (4.8)$$

$$C_G = 0,37 \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}}$$

Considerando o valor de 3,04 kWh / dia ilustrado na Tabela 4.1 e um valor médio da tarifa de energia elétrica de R\$ 0,3867 (ABRADEE, 2013), é possível calcular o tempo de amortização (T_A) da dívida de acordo com a equação (4.9).

$$T_A = \frac{8160}{0,3867 \times 3,04 \times 30 \times 12} \frac{\text{R\$}}{\frac{\text{R\$}}{\text{ano}}} \quad (4.9)$$

$$T_A = 19,28 \text{ anos}$$

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cenário energético global enfrenta o desafio de produzir mais energia para suprir as crescentes necessidades e, ao mesmo tempo, evitar a degradação do meio ambiente e as emissões de gases poluentes. Deste modo, a busca por alternativas sustentáveis, a fim de fornecer a energia necessária tanto para o desenvolvimento como para o bem estar da sociedade, se faz necessário.

Nesse contexto, pode-se citar a microgeração como uma alternativa viável e sustentável. É possível citar exemplos de sucesso como os países europeus Alemanha e Itália os quais oferecem incentivos governamentais e juntos injetaram, através de energia solar, 11 GW na rede no ano de 2012.

Quando é possível aliar um sistema de microgeração a uma microrrede CC proporciona-se o uso racional de energia, pois desta maneira, evita-se as perdas relativas às conversões de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) feitas com o intuito de se injetar energia na rede elétrica e, posteriormente, a conversão inversa, CA para CC, a fim de alimentar dispositivos eletrônicos.

De acordo com o estudo de caso apresentado no capítulo 4, pode-se afirmar que a instalação de uma microrrede CC em conjunto com um módulo de microgeração é possível e capaz de reduzir os custos residenciais com a conta de energia elétrica, além de oferecer benefícios para a rede, atuando com um fator de mitigação do fluxo de potência.

É importante ressaltar que a viabilidade desses sistemas depende da criação de um mercado para os aparelhos eletrônicos os quais deverão passar por modificações para se adequar a esse novo sistema. Essas modificações podem ser resumidas, abrangentemente, na retirada dos inversores que transformam a tensão CA da rede em tensão CC para que tal aparelho atenda a suas funcionalidades. De maneira semelhante, é necessário um mercado de equipamentos voltados para a utilização exclusiva em circuitos de corrente contínua, principalmente aqueles voltados à interrupção de correntes.

Além disso, deve-se criar normas que guiem a construção segura destes sistemas, bem como mão de obra qualificada para execução e implementação dos projetos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRADEE. **A tarifa de energia**. 2012. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia/tarifas-de-energia>>. Acesso em: 12 dez. 2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Grupo Técnico de Trabalho. **Smart Grid: Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes** Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2010. 228 p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/acoes/Energia/Relatxrio_GT_Smart_Grid_Portaria_440-2010.pdf>. Acesso em: 25 set. 2013.

CANAZIO, Alexandre. **Microgeração: expectativas no mercado**. Disponível em: <<http://www.redeinteligente.com/2013/02/12/microgeracao-expectativas-no-mercado/>>. Acesso em: 25 set. 2013.

CARNEIRO, Joaquim. **Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos: Sistemas Ligados a Rede e Sistemas Autônomos**. 2009. 37 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Têxtil, Departamento de Física, Universidade do Minho, Guimarães, 2009. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16965/1/DIMENSIONAMENTO%20E%20SISTEMAS%20FOTOVOLTAICOS.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2013.

CRONSHAW, Geoff. Future developments in International Standards for electrical installations. **Wiring Matters**, London, n. , p.3-9, 09 jun. 2010.

DEVIENNE FILHO, Roberto. **Microgeração: um pequeno grande negócio**. Disponível em: <<http://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2010/04/microgeracao-pequena-no-nome-mas-grande-nas-oportunidades/2441>>. Acesso em: 20 ago. 2013.

EDP (Portugal). **EDP lança conceito InovCity em Évora.** Disponível em: <<http://www.edp.pt/pt/media/noticias/2010/Pages/EDPlancaconceitoinovCityemEvora.aspx>>. Acesso em: 22 ago. 2013.

HELDWEIN, Marcelo Lobo. Distribuição em CC para integração de fontes distribuídas: Eficiência em redes ativas de distribuição. In: SEMINÁRIO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E CONTROLE, 4., 2010, Santa Maria. **Anais...** . Santa Maria: Ufsm, 2010. p. 1 - 52. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/gepoc/sepoc/sepoc2010/progpara_arquivos/Distribuciao_CC_SEPOC_2010.pdf>. Acesso em: 25 out. 2013.

INEE. **Geração Distribuída e Cogeração.** Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp>. Acesso em: 29 ago. 2013.

INPE (São Paulo) (Org.). **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** São José dos Campos: Editora Universitária Ufsc, 2006. 60 p. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2013.

MANSUR, Alexandre. **Vamos queimar o metano da Usina de Balbina para gerar eletricidade.** Disponível em: <<http://colunas.revistaepoca.globo.com/planeta/2009/10/01/vamos-queimar-o-metano-da-usina-de-balbina-para-gerar-eletricidade/>>. Acesso em: 25 nov. 2013.

MUSTAFA, Doaa Mokhtar Yehia Ali. **Deliverable Power Characteristics in Low Voltage DC Distribution System Based on Voltage Stability.** 2012. 111 f. Dissertação (Doutorado) - Nagoya University, Nagoya, 2012. Disponível em: <<http://ir.nul.nagoya-u.ac.jp/jspui/bitstream/2237/16630/1/k9005.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2013.

NIELSON, Rafael. **Impactos da microgeração para os centros de operação e controle:** Experiência da CELG Distribuição S/A. Disponível em: <http://www.rpmbrasil.com.br/cenocon2013/coc13_rafael_nielson.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2013.

ONS (Brasil). **Impacto da Integração das Fontes Renováveis Alternativas de Energia no Sistema.** Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/Responsabilidade_Social/Impactos%20das%20Energias%20Renov%C3%A1veis%20no%20Sistema%20Interligado%20Nacional%20-%20Rio+20.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2013.

PRADA, Rodrigo. **Consumo de energia: quanto gasta uma TV na conta de luz?** 2010. Disponível em: <<http://www.tecmundo.com.br/plasma/3731-consumo-de-energia-quanto-gasta-uma-tv-na-conta-de-luz-.htm>>. Acesso em: 21 out. 2013.

SALOMONSSON, Daniel. **Modeling, Control and Protection of Low Voltage DC Microgrids.** 2008. 66 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Kth, Estocolmo, 2008. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:13328/FULLTEXT01>>. Acesso em: 15 out. 2013.

SANTOS, Carlosalberto dos. **O empreendedor Edison ou o visionário Tesla?** 2011. Disponível em: <<http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/do-laboratorio-para-a-fabrica/o-empendedor-edison-ou-o-visionario-tesla>>. Acesso em: 25 nov. 2013.

SEGUEL, Julio Igor López. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital.** 2009. 203 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/farias/materiais/316M.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2013.

SOLAR-POWERED HOMES REMAIN A DISTANT DREAM FOR MANY IN THE US: Solar power in the US is booming in large scale utility-size projects, but the residential market is . Yale, 15 ago. 2011. Disponível em: <<http://www.theguardian.com/environment/2011/aug/15/solar-powered-homes-us>>. Acesso em: 06 set. 2013

SPATUZZA, Alexandre. Resistências culturais à microgeração existem no governo e no sistema financeiro. Disponível em: <<http://revistasustentabilidade.com.br/resitencias-culturais-a-micro-geracao-existem-no-governo-e-no-sistema-financeiro/>>. Acesso em: 16 ago. 2013

STARKE, Michael. **AC vs. DC Distribution: A Loss Comparison**. Knoxville: Ieee, 2008. 7 p. Disponível em: <http://web.eecs.utk.edu/~tolbert/publications/pestd2008_starke.pdf>. Acesso em: 11 out. 2013.

STELTS, Michael. **The Necessity for LVDC Power in Home Entertainment**. Disponível em: <<https://www.vde.com/en/dke/DKEWork/NewsfromtheCommittees/2011/documents/2%202%201.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2013.

UFSC; ELETROBRAS. **Casa Eficiente: Consumo e Geração de Energia**. 2. ed. Florianópolis: Ufsc, 2010. 80 p. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTsvc.asp?DocumentID=%7BA78E7AE9-164D-4A94-B67B-57468B0B0191%7D&ServiceInstUID=%7BAE43DA-69AD-4278-B9FC-41031DD07B52%7D>>. Acesso em: 13 out. 2013.

WWF. **Além de grandes hidrelétricas: Políticas para fontes renováveis de energia elétrica no Brasil**. Brasil, 2012. Disponível em: <http://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/alem_de_grandes_hidretricas_sumario_para_tomadores_de_decisao.pdf>. Acesso em: 19 set. 2013.